

Damian DZIANOK*, Przemysław POSTAWA**

*Bocar sp. z o.o. Korwinów

ul. Okólna 15, 42-263 Wrzosowa

** Politechnika Częstochowska, Zakład Przetwórstwa Polimerów,

Armii Krajowej 19c, 42-200 Częstochowa,

e-mail: postawa@ipp.pcz.pl

Wpływ typu wzmocnienia oraz osnowy kompozytu na wytrzymałość na zginanie

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań trójpunktowego zginania kompozytów na bazie dwóch żywic z trzema rodzajami zbrojenia. Zastosowanymi żywicami były Aropol M105TB i Sirca HN800 natomiast zbrojeniem mata szklana emulsyjna 300 g/m², mata szklana proszkowa 300 g/m² i tkanina Saerex (COMBO 600/300). Próbkę w postaci płyt zostały wykonane metodą ręcznego laminowania a następnie wycięte na określony wymiar metodą cięcia wodą. Otrzymane próbki poddano badaniu wytrzymałości metodą trójpunktowego zginania. Prawidłowość badań potwierdza mała rozbieżność wyników pomiędzy poszczególnymi próbkami wykonanymi z tych samych materiałów. Artykuł zawiera zdjęcia z przebiegu przygotowania próbek i ich badań oraz wyniki zarówno w formie tabelarycznej [Tab. 1] jak i w postaci wykresów [Rys. 11-17]. Badania dowiodły, że największy wpływ na właściwości kompozytu powstałego z żywicy oraz maty szklanej bądź też tkaniny ma zastosowane wzmocnienie.

Słowa kluczowe: kompozyty, włókno szklane, odporność na zginanie

Abstract: The article presents the results of three-point bending for two types of resins combined with three types of reinforcement. Applied resins were AROPOL M105TB and HN800 Sirca while the reinforcements were glass mat emulsion of 300 g / m², glass mat powder 300 g / m² and fabric Saerex (COMBO 600/300). The samples in form of plates were made by hand lamination then cut to a specific dimension by the method of water cutting. Prepared samples were tested for flexural strength by three point bending. Correctness of study is confirmed by small discrepancies between results for individual samples made of the same material. The article contains both images of the sample preparation process and the results of their research in tabular form [Tab. 1] and in the form of diagrams [Fig. 11-17]. Studies have shown that the largest effect on the properties of composite created from resin and glass mat or fabric has the applied reinforcement.

Keywords: composites, glass fiber, bending resistance

WSTĘP

Postęp technologii jest nierozłącznie związany z powstawaniem coraz nowszych a zarazem bardziej złożonych materiałów konstrukcyjnych. Początek tworzenia materiału przeznaczonego do danego celu zachodzi wtedy, kiedy warunki wytrzymałościowe są sprecyzowane. Konstruując nowy rodzaj materiału spełniający określone parametry oraz wytrzymujący warunki otoczenia, w jakich pracuje, inżynierowie tworzą kompozyt zawierający różne

materiały o różnych strukturach chemicznych po to, aby tym warunkom sprostać. Biorąc pod uwagę materiały włókniste każdy konstruktor ma do dyspozycji ich szeroki wachlarz począwszy od włókien szklanych, węglowych, aramidowych, polietylenowych, polipropylenowych, bazaltowych oraz ceramicznych, które można łączyć poprzez sploty w pojedynczych matach jak również łącząc kilka mat zszytych razem tworząc tkaninę. Włókno oraz polimer, który jest jego osnową różnią się od siebie takimi cechami jak właściwości mechaniczne i cieplne oraz

rodzaj odkształcenia podczas działania siły. Stąd użycie włókien w matrycy polimerowej daje tak szerokie możliwości stosowania. Projektując nowy materiał kompozytowy nigdy nie należy zakładać, że posiada on cechy i właściwości sumujące lub uśredniające cechy i właściwości jego składników. Rola matrycy najczęściej ogranicza się do ochrony zbrojenia kompozytu oraz do nadania kształtu wyrobu gotowego. Rola wzmocnienia spoczywa na włóknach zbrojących nadających kompozytowi wysokie właściwości mechaniczne. Należy jednak pamiętać, że właściwości kompozytu jako monolitu zależą od zastosowanej żywicy, napełniacza i jego geometrii dostosowanej do charakterystyki obciążenia, jakie na nią oddziałuje. Przedstawione materiały charakteryzują się właściwościami pozwalającymi na ich szerokie zastosowanie podczas projektowania elementów mechanicznych pracujących przy zróżnicowanych warunkach środowiskowych. Włókna szklane są materiałem zbrojącym wykorzystywanym najczęściej nie tylko ze względu na ich łatwą dostępność i niską cenę, choć są to argumenty bardzo istotne przy minimalizowaniu kosztów produkcji, ale przede wszystkim na łatwość ich formowania oraz dużą liczbę postaci, w jakich występują. [1–4]

Do najbardziej popularnych typów włókien szklanych należą włókna oznaczone symbolem E i S. Włókna szklane typu S charakteryzują się wyższą: wytrzymałością, sprężystością, udarnością, odpornością na zmęczenie oraz odpornością termiczną niż włókna typu E natomiast są znacznie droższe i dlatego rzadziej stosowane. Włókna typu S produkowane są głównie z myślą o przemyśle obronnym, gdyż to tam są stosowane najczęściej. Można wyróżnić również włókna szklane typu D posiadające niską stałą dielektryczną, typu ECR o podwyższonej odporności na korozję, typu C o wysokiej wytrzymałości chemicznej, typu M o wysokiej sztywności, typu A wysoko zasadowe lub sodowo-wapniowe [3, 5].

Włókno szklane występuje w wielu postaciach takich jak: rowing- połączone pasma włókien pokrytych preparacją, rowing cięty, maty będące połączeniem rowingu ciętego i lepszczca,

tkaniny. Charakterystyczną cechą tych włókien biorąc pod uwagę ich zalety konstrukcyjne jest duża wytrzymałość na rozciąganie przy niskich wartościach modułu Younga. Wytrzymałość kompozytu zawierającego zbrojenie z włókna szklanego jest zależna od średnicy włókien; im jest ona mniejsza tym kompozyt jest bardziej wytrzymały. Wraz ze zmniejszeniem średnicy włókien wzrasta moduł sprężystości oraz wytrzymałość na rozciąganie bez spadku wydłużenia przy zerwaniu. [1,4]

Porównując włókna szklane i węglowe widać, że zaletą tych pierwszych jest nie tylko znacznie niższa cena lecz również duża zdolność pochłaniania energii. [6]

Osnowa ma niewielki wpływ na późniejsze cechy wytrzymałościowe kompozytu jednak jest niezbędnym spoiwem łączącym włókna, co umożliwia wytwarzanie elementów konstrukcyjnych. Moduł wytrzymałości na rozciąganie oraz moduł sprężystości żywicy w odniesieniu do włókien jest zazwyczaj mniejszy o dwa rzędy wielkości. Najczęściej używanymi rodzajami żywic wśród producentów elementów kompozytowych są żywice termoutwardzalne i termoplastyczne. Czynnikiem odróżniającym żywice termoutwardzalne od termoplastycznych jest ich zachowanie przy wprowadzeniu w środowisko wysokich lub niskich temperatur otoczenia. Żywice termoplastyczne przy ogrzewaniu mięknie natomiast przy ochładzaniu twardnieją a proces ten jest odwracalny. Inaczej jest w przypadku żywic termoutwardzalnych, gdzie na skutek oddziaływania wysokiej temperatury żywica ulega trwałemu utwardzeniu a kolejne ochłodzenie i podgrzanie nie spowoduje mięknięcia i ponownego utwardzenia. [7]

Przykładów elementów, które powstały i nadal powstają z kompozytów włóknistych jest bardzo wiele, gdyż mają one bardzo szerokie zastosowanie. Do przykładów można zaliczyć przemysł motoryzacyjny, lotniczy, zabawkarski czy sportowy. Materiał ten jest coraz częściej używany ze względu na bardzo pożądane cechy takie jak wysoka wytrzymałość mechaniczna połączona z niską wagą wyrobu gotowego. Cechy te są niemożliwe do uży-

skania przez materiały takie jak metale bez kosztownej obróbki poprzedzonej czasochłonnymi obliczeniami wytrzymałościowymi oraz badaniami. Realia obecnych czasów gdzie liczy się szybkość działania załogi przedsiębiorstwa i skuteczność w spełnieniu oczekiwań klienta umacniają wysoką pozycję materiałów kompozytowych obecnych na rynku w postaci wyrobu gotowego [8–13].

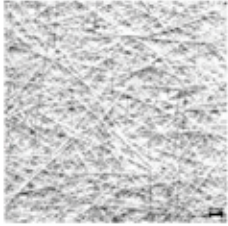
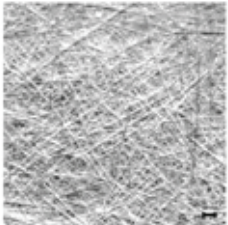
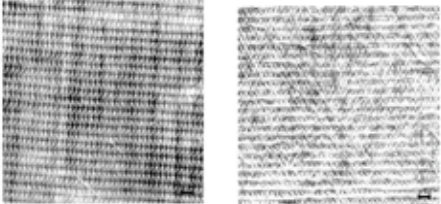
ZASTOSOWANE MATERIAŁY

Jako materiał osnowy do przygotowania próbek kompozytów wybrano dwie żywice poliestrowe:

- Aropol M105 TB – żywica ortoftalowa o obniżonej emisji styrenu, tiksotropowana, przeznaczona do laminowania ręcznego z włóknem szklanym; czasy żelowania w temperaturze 23°C i określonej zawartości inicjatora są następujące:
 - 1% MEKP – 40 min
 - 1,25% MEKP – 32 min
 - 1,5% MEKP – 25 min
- Sirca HN800 – żywica winyloestrowa; czas żelowania żywicy w temperaturze 25°C i określonej zawartości inicjatora:
 - 1,25% MEKP – 27–35 min
 Każdą z przygotowanych kompozycji utwardzono inicjatorem Butanox M-50VR [15] – średnio reaktywnym nadtlenkiem metyloetyloketonu. Jako wzmocnienie wykorzystano następujące materiały:
 - mata szklana emulsyjna 300 g/m² firmy Krosglass.
 - mata szklanej proszkowa 300 g/m² firmy Krosglass.
 - tkanina COMBO 600/300 firmy Searex
 Szczegółowe dane użytych wzmocnień przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka materiałów zastosowanych jako wzmocnienie badanych kompozytów

Table 1. Characteristics of materials for the reinforcement of tested composites

Oznaczenie i opis właściwości	Zdjęcie
<p>Mata szklana emulsyjna 300 g/m²</p> <p>Właściwości:</p> <ul style="list-style-type: none"> – miękka mata szklana, która dobrze układa się w formie – przesyca się w nienasyconej żywicy poliestrowej – zapewnia łatwe odprowadzenie powietrza podczas laminowania – odporność na zmienne warunki atmosferyczne – dobre właściwości mechaniczne 	
<p>Mata szklana proszkowa 300 g/m²</p> <p>Właściwości:</p> <ul style="list-style-type: none"> -mata sztywna – szybko przesyca się w nienasyconej żywicy poliestrowej – laminat wykonany z tej maty charakteryzuje się gładkością powierzchni oraz znacznym stopniem transparentności – odporność na zmienne warunki atmosferyczne – dobre właściwości mechaniczne 	
<p>Saerex (COMBO 600/300)</p> <p>Właściwości:</p> <ul style="list-style-type: none"> – duża wytrzymałość mechaniczna wyrobu gotowego – odporność na uderzenia gotowych wyrobów – szybsze układanie w formach – szybsze laminowanie – ujednolicona orientacja włókien 	 <p>(wierzch) (spód)</p>

PRZYGOTOWANIE PRÓBEK

Kompozyty w których skład wchodzi żywice poliestrowe można łatwo formować bez konieczności użycia podciśnienia lub form, co pozwala zmniejszyć koszty produkcji. Grubość laminatu powinna wahać się w zakresie 2–10mm. [5]

Próbki zostały wykonane metodą laminowania ręcznego (rys. 1) na płaskiej oczyszczonej powierzchni formy pokrytej woskiem rozdzielającym. Pierwszą czynnością było dokładne zmieszanie żywicy Aropol M105TB oraz Sirca HN800 z inicja-

torem Butanox M-50VR w ilości 1,5% z dodatkiem NL-49P (0,5% objętości inicjatora). Kolejnym etapem było ułożenie pierwszej warstwy maty i przesylenie jej żywicą. Po ułożeniu kolejnych warstw i przesyleniu ich żywicą laminaty były dokładnie rolowane za pomocą specjalnych wałków tak, aby docisnąć maty do siebie i pozbyć się pęcherzyków powietrza. Czynność tę powtarzano za każdym razem po nałożeniu warstwy. Otrzymana w ten sposób płaska płyta laminatu o wymiarach 200x300mm została pozostawiona do czasu utwardzenia, a następnie odformowana.



Rys. 1. Laminowanie ręczne elementów kompozytowych.

Fig. 1. Manual lamination composite elements.

Z tak przygotowanych płyt o grubości od 3 do 5 mm zostały wycięte próbki o wymiarach 145x23 mm. Do cięcia wykorzystano technologię cięcia strumieniem wody (rys. 2) urządzeniem firmy CMS Technocut Idroline przy zastosowaniu trybu „cięcie szkła”, tak

aby podczas uderzenia strumienia wody nie nastąpiła delaminacja poszczególnych warstw w miejscu wycinania próbki. Z każdej płyty laminatu wycięto z zachowaniem kierunku cięcia po 5 próbek. Oznaczenia przygotowanych serii próbek przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wykaz materiałów dla poszczególnych serii próbek.

Tabele 2. List of materials for each series of samples.

Materiał: Osnowa / zbrojenie	Oznaczenie próbki
Sirca HN800 VE poliester / Mata proszkowa 300 g/m ²	k21
Aropol M105TB / Mata proszkowa 300 g/m ²	k22
Aropol M105TB / Mata emulsyjna 300 g/m ²	k23
Sirca HN800 VE poliester / Mata emulsyjna 300 g/m ²	k24
Aropol M105TB / Saerex S14EB540-00620-01300-487330(COMBO 600/300)	k25
Sirca HN800 VE poliester / Saerex S14EB540-00620-01300-487330(COMBO 600/300)	k26



Rys. 2. Wycinanie próbek metodą water-jet.

Fig. 2. Water-jet cutting proces of samples

OPIS BADAŃ

Badanie trójpunktowego zginania dla sporządzonych próbek wykonano za pomocą maszyny wytrzymałościowej InspektDesk20 firmy Hegewald&Peschke (rys. 3) posiadającej system rejestracji zmian wartości siły w funkcji prze-

mieszczenia. Badania przeprowadzono przy następujących parametrach:

- rozstaw podpór – 60 mm
- średnica wałków podpierających i wałka aktywnego – 10 mm
- prędkość przemieszczania się górnej trawersy – 20 mm/min



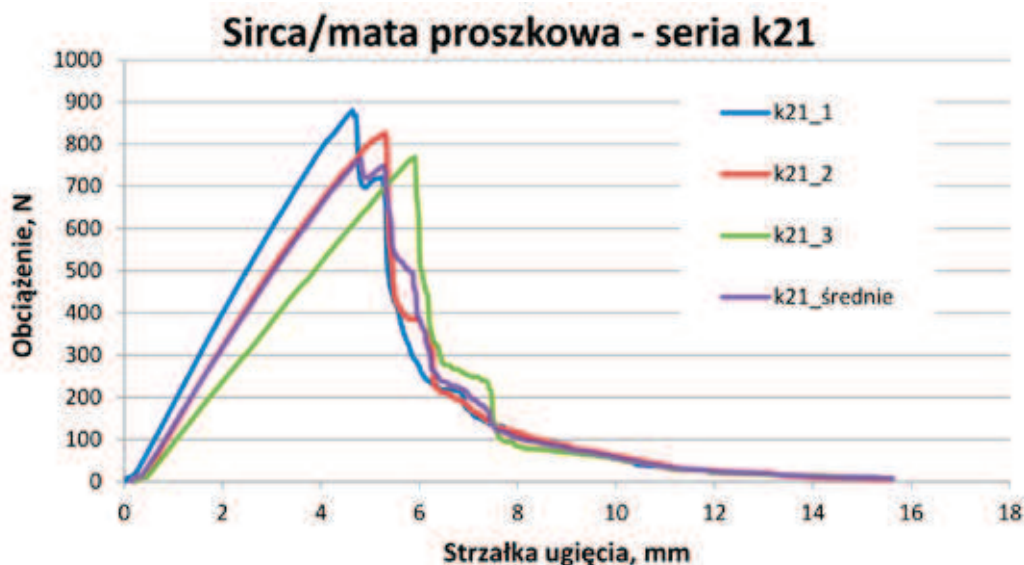
Rys. 3. Sposób umieszczenia próbki podczas testów metodą trójpunktowego zginania.

Fig. 3. The placement of the sample during three-point bending tests

WYNIKI BADAŃ

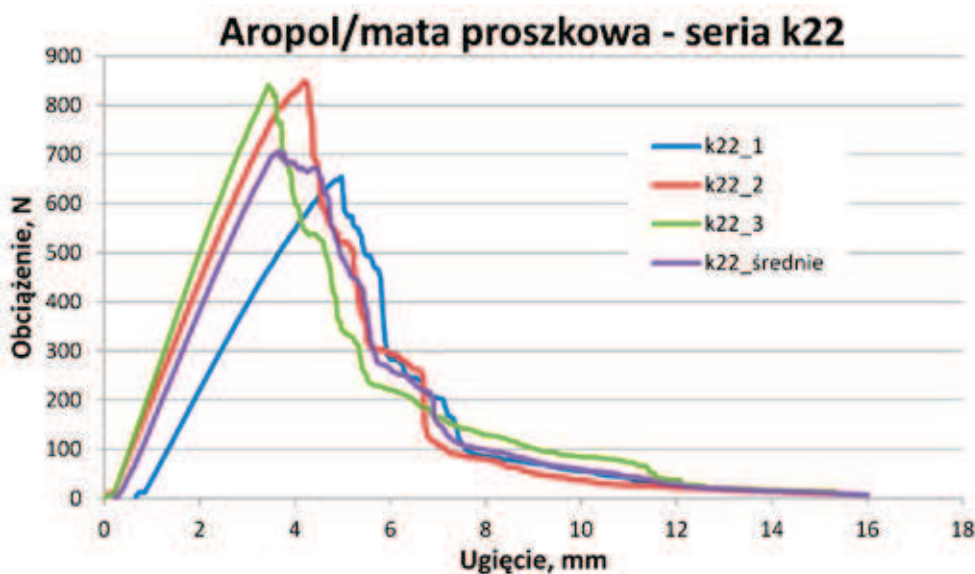
Podczas prób zarejestrowano przebiegi zmian wartości siły w funkcji strzałki ugięcia. Dla każdej z serii wykonano po 5 powtórzeń, natomiast na wykresach przedstawiono po 3 najbardziej zbliżone

przebiegi krzywych zginania. Wyniki przedstawiono w postaci zbiorczych wykresów dla każdej z serii oraz wspólnego wykresu zbiorczego średnich przebiegów wszystkich testowanych materiałów (rys. 4–10). Ponadto przedstawiono wszystkie wyniki w postaci tabelarycznej [Tab.3].



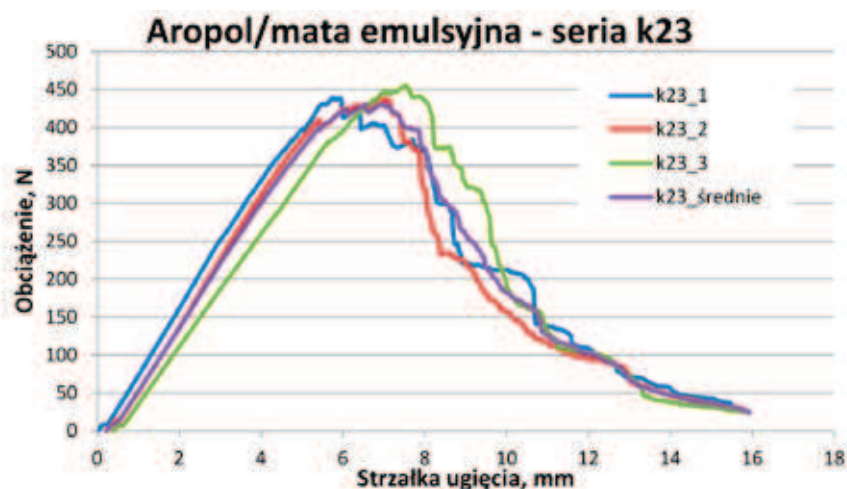
Rys. 4. Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k21

Fig. 4. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k21)



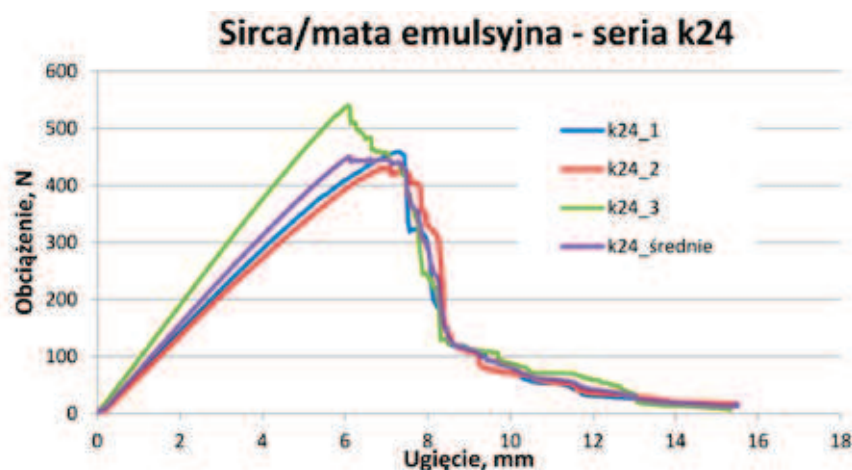
Rys. 5. Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k22

Fig. 5. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k22)



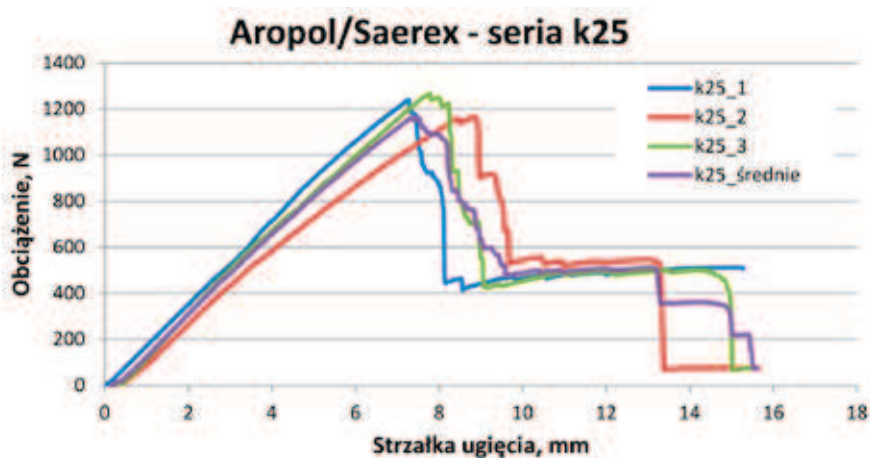
Rys. 6. Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k23.

Fig. 6. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k23)



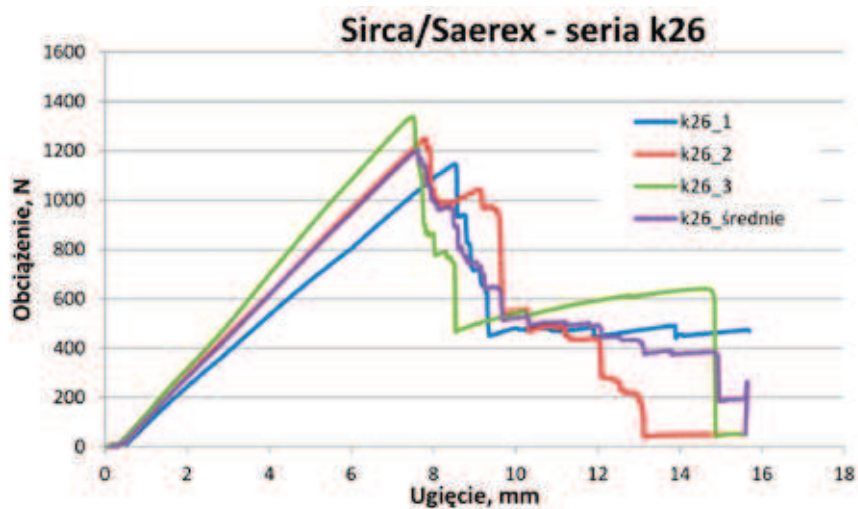
Rys. 7. Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k24.

Fig. 7. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k24)

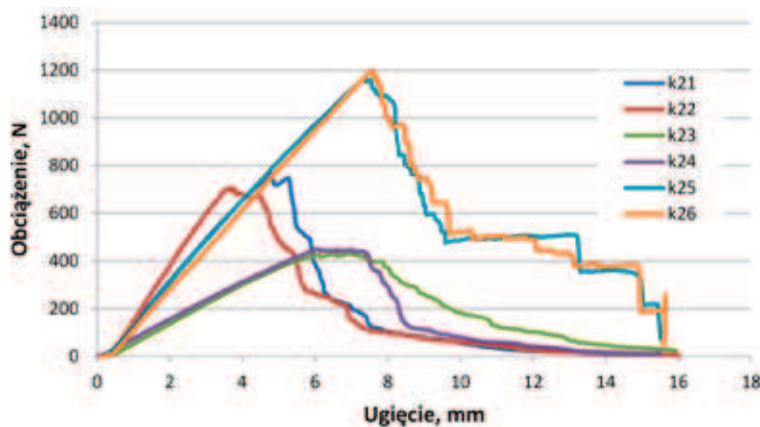


Rys. 8 Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k25

Fig. 8. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k25)



Rys. 9. Przebieg zmian obciążenia w funkcji strzałki ugięcia serii k26
 Fig. 9. Changes of the sample load vs. sample deflection (series k26)



Rys. 10. Zestawienie średnich wyników uzyskanych podczas testów dla serii k21- k26.
 Fig. 10. Presentation all results obtained during the tests for sample series k21-k26



Rys.11. Odkształcenie pozostałe w próbkach po wykonanych próbach zginania
 Fig. 11. The deformation remaining in the samples after the bending tests carried out

Tabela 3. Zestawienie wyników trójpunktowego zginania dla każdej z próbek

Table 3. Summary of the results of three point bending for each sample

Nr próbki	Wartość siły F , N	Wytrzymałość na zginanie δ_g , MPa	Średnia siła F_{sr} [N] / Odchylenie stand.	Średnia wytrzymałość na zginanie δ_{gsr} MPa / Odchylenie stand.
k21_1	878,62	209,2	824,61 / 54,58	205,32 / 3,45
k21_2	825,74	202,62		
k21_3	769,48	204,14		
k22_1	653,86	169,51	781,38 / 110,50	166,92 / 15,02
k22_2	848,98	180,48		
k22_3	841,3	150,77		
k23_1	439,32	154,36	444,31 / 9,57	172,75 / 19,87
k23_2	438,26	170,08		
k23_3	455,34	193,82		
k24_1	458,96	241,39	476,8 / 56,53	237,38 / 5,27
k24_2	431,34	231,41		
k24_3	540,1	239,34		
k25_1	1240,94	340,29	1224,64 / 51,64	345,37 / 18,48
k25_2	1166,82	365,85		
k25_3	1266,16	329,96		
k26_1	1145,08	390,63	1244,25 / 96,53	380,13 / 9,29
k26_2	1249,78	376,82		
k26_3	1337,9	372,95		

PODSUMOWANIE I WNIOSKI Z BADAŃ

Poprawność przygotowania laminatu została potwierdzona stosunkowo małą rozbieżnością pomiędzy wynikami badań poszczególnych próbek (rys. 10, Tab. 3), a pęknięcia przebiegały w sposób powtarzalny z wyjątkiem próbki K26-2, gdzie nastąpiła delaminacja i ugięcie próbki bez pęknięcia warstwy wierzchniej (rys. 11). Czynnikiem powodującym wahania wyników w przypadku kompozytu zawierającego matę o włóknach nieukierunkowanych jest różnica w ukierunkowaniu jej włókien w różnych miejscach, gdyż włókna największą wytrzymałość mechaniczną wykazują podczas obciążenia osiowego. Rozrzut pomiędzy wynikami dla próbek wykonanych z tej samej maty oraz żywicy

najprawdopodobniej wynika z ręcznej metody przygotowania kompozytu, gdzie podczas laminowania brak jest pełnej kontroli i powtarzalności tego procesu, a wtrącenia w postaci pęcherzyków powietrza mogą powodować osłabienie próbki. Kształt próbek uzyskanych po testach zginania (rys. 18) dowodzi różnego zachowania się próbek. Część z nich po teście zginania nie powróciła do pierwotnego kształtu co świadczy o pęknięciu wszystkich warstw tworzących próbkę. Natomiast próbki k25 i k26, które wykazały największe wartości siły podczas zginania, nie zostały przełamane do końca. Pozostały warstwy, które są w stanie jeszcze odkształcić próbkę do pierwotnego kształtu.

Przeprowadzone badania wykazały jak ważny w przypadku konstruowania elementów kompozytowych jest dobór odpowiednich ma-

teriałów przy wytwarzaniu kompozytów poliestrowo-szkłanych oraz jak różne charakterystyki wytrzymałościowe można uzyskać stosując różne materiały osnowy i napelnacza.

Zmiany obciążenia w funkcji strzałki ugięcia wszystkich badanych kompozytów (rys. 10) pokazuje w jak różny sposób zachowują się badane próbki. Dotyczy to zarówno fazy wzrostu naprężenia w próbkach, chwili pęknięcia pierwszej warstwy oraz kolejnych podczas przemieszczania trawersy maszyny wytrzymałościowej. Bardzo wiele można wywnioskować z pozostałości badanych próbek i ich kształtu zachowanego po procesie zginania. Próbki oznaczone jako k21-k24 pozostały po testach zginania w swoim położeniu natomiast próbki k25 i k26 wykazały powrotne odkształcenie sprężyste co świadczy o niepełnej destrukcji wszystkich warstw kompozytów.

Przygotowanie próbek i ich wycięcie zostało wykonane dzięki uprzejmości firmy Bocar sp. z o.o. firma przekazała też wszystkie materiały do badań – żywice oraz wypełniacze.

LITERATURA

1. Perepelkin K. *Polymeric fibre composite, Basic types, principles of manufacture and properties. Part 2. Fabrication and properties of polymer composite materials.* Fibre chemistry, vol.37, no.5,381, 2005.
2. Boczkowska A, Kapuściński J, Puciłowski K, Wojciechowski S, *Kompozyty*, Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.
3. Dąbrowski H, *Wytrzymałość polimerowych kompozytów włóknistych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
4. Ochelski S., Niezgodą T., *Rodzaj i struktury kompozytów pochłaniających energię uderzenia*, Przegląd Mechaniczny, zeszyt 12/2005
5. Salleh Z., Nordin N., Saad I., *Comparison of Mechanical Properties for Polypropylene (PP), Laminated on Fiberglass/Epoxy Resin and Aluminium Net/Epoxy Resin Composites*, Institute of Research, Development and Commercialisation. Malaysia 2002.
6. Liu J, Wang P.H, Li R.Y, Appl J, *Polym. Sci.* 52(7), 945, 1994.
7. German J, *Materiały kompozytowe w budownictwie cz.I, Kalejdoskop budowlany*, PWB, Warszawa, , nr.6, str.14–17, czerwiec 2000.
8. Romanzini D., Lavoratti A., Ornaghi H. L., Amico S., Zattera A., *Influence of fiber content on the mechanical and dynamic mechanical properties of glass/ramie polymer composites*, Materials and Design, 47, 2013
9. Dandekar D., Botelera J., Beaulieub P., *Elastic constants and delamination strength of a glass-fiber-reinforced polymer composite*, Composites Science and Technology 58, 1998
10. Avcia A., Arikant H., Akdemira A., *Fracture behavior of glass fiber reinforced polymer composite*, Cement and Concrete Research, 34, 2004
11. Garoushi S., Vallittu P., Lassila L., *Short glass fiber reinforced restorative composite resin with semi-inter penetrating polymer network matrix*, Dental materials 23, 2007
12. Jiang X., Kolstein H., Bijlaard F., *Moisture diffusion in glass-fiber-reinforced polymer composite bridge under hot/wet environment*, Composites Part B 45, 2013
13. Godara A., Raabe D., *Influence of fiber orientation on global mechanical behavior and mesoscale strain localization in a short glass-fiber-reinforced epoxy polymer composite during tensile deformation investigated using digital image correlation*, Composites Science and Technology, 67, 2007
14. http://crysticroof.com/uploads/files/102_butanox_ps.jpg. Z dnia 12.01.2016.

Publikację przyjęto do druku: 05.07.16